

Modellierung, Simulation und Steuerung flexibler Fertigungssysteme

Krebs, Volker
Rehkopf, Andreas

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1992 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.119-129



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

VOLKER KREBS und ANDREAS REHKOPF, Karlsruhe

Modellierung, Simulation und Steuerung flexibler Fertigungssysteme*

1. Einführung

Die diesem Beitrag zugrundeliegenden Arbeiten¹⁾ haben das Ziel, Methoden zur Beschreibung und Simulation von diskreten ereignisorientierten dynamischen Prozessen (DEDP) am Beispiel Flexibler Fertigungssysteme (FFS) zu entwickeln und zu erproben, sowie eine Optimierung des Fertigungsablaufs im Sinne einer Regelung vorzunehmen. Dazu wird eine hierarchische Systemstruktur aufgebaut, in der die Methode der Petrinetze (PN), ergänzt durch wissensbasierte Komponenten, zu einem effizienten integrierten Gesamtsystem führen.

Konkret wird eine aus einem Verbund von sechs Bearbeitungsmaschinen bestehende Fertigungsanlage betrachtet, die durch zeitbewertete Petrinetze in zwei Abstraktionsebenen modelliert wird. Die einzelnen Bearbeitungsmaschinen der oberen Modellierungsebene liegen als PN-Module vor und werden auf der unteren Ebene jeweils als detailliertes, ebenfalls modulares PN-Maschinenmodell dargestellt, wobei hier als repräsentative technische Grundlage für den PN-Modellentwurf die Fertigungszelle MD 5 der Firma Gildemeister gewählt wurde. Diese beiden Abstraktionen bilden zusammen das dynamische ereignisdiskrete Prozeßmodell (DEDP-Modell) „Petri-netz“, das in dem klassischen Ebenenmodell der Fertigungssteuerung nach Bild 1 der Maschinenebene entspricht. Die über der Maschinenebene liegende Steuerungsebene, sowie die darüber liegende PPS-Ebene (PPS: Produktionsplanung und -Steuerung) werden in dem äquivalenten Ebenenmodell – wie es hier Gegenstand der Betrachtung ist – zusammen als DEDP-Ebene „Planung und Steuerung“ verstanden (Bild 1). Dabei erfolgt die Steuerung des Fertigungsablaufs in der realisierten PN-Modellstruktur des FFS über einen wissensbasierten Ansatz auf Basis der XPS-Entwicklungsumgebung „Goldworks“ unter Einbeziehung deterministischer und heuristischer Optimierungsstrategien. Simulationsuntersuchungen des Fertigungsablaufs gestatten vertieften Einblick in das Systemverhalten und ermöglichen einen Vergleich der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Strategien zur Fertigungssteuerung.

¹⁾ Das Vorhaben wurde mit freundlicher Förderung durch die DFG im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Messen, Steuern, Regeln von Systemen komplexer Struktur“ (Az. Kr. 949/2) durchgeführt.

* Vortrag bei der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 19. Juni 1992.

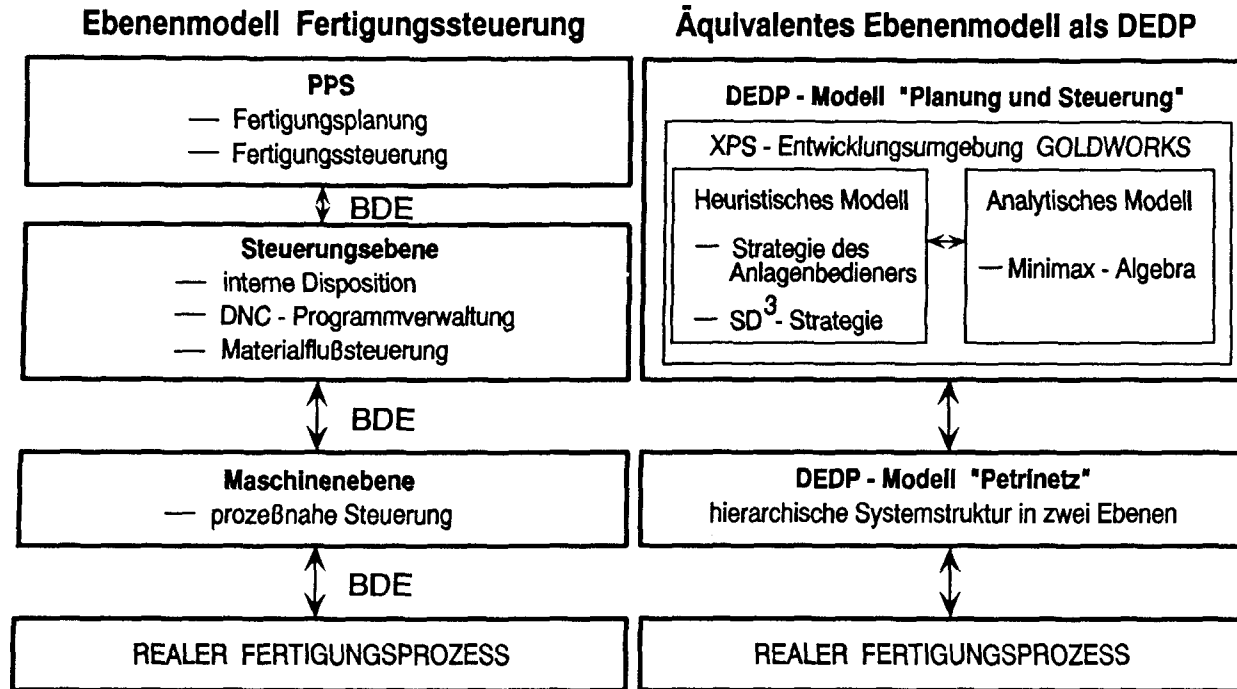


Bild 1: Ebenenmodell der Fertigungssteuerung (links) und äquivalentes DEDP - Modell (rechts)

Bild 1: Ebenenmodell der Fertigungssteuerung (links) und äquivalentes DEDP-Modell (rechts).

2. Modellierung und Simulation der Fertigungsanlage mit Petrinetzen

In einer Vielzahl automatisierungstechnischer Anwendungen hat sich die aus dem Bereich der Automatentheorie stammende Methode der Petrinetze (PN) zur Modellierung komplexer, parallelstrukturierter Prozeßabläufe bereits sehr gut bewährt [1], [2], [3]. Nach C. A. Petri können Prozesse als vernetzte Systeme von Situationen (z. B. Bearbeitungs-/Maschinensystemzustände) und Ereignissen (sprungförmige Zustandsveränderungen bzw. unvorhergesehene Fehlerereignisse) verstanden werden, wobei Situationen im PN sog. Stellen (graphisch Kreise) und Ereignisse sog. Transitionen (graphisch Kästchen) entsprechen. Zur Darstellung der Kausalität von Abläufen wie Informations- und Materialfluß, erhalten bestimmte Stellen des Netzes Marken (graphisch dargestellt als Punkte in den entsprechenden Kreisen), die nach definierten Regeln über die gerichteten Kanten, den Verbindungslinien der Stellen und Transitionen, durch das Netz wandern. Die Markenwanderung wird mittels der Transitionen bewerkstelligt, die Marken aus ihren Vorstellen entnehmen und Marken in ihren Folgestellen ablegen (Schalten oder Feuern der jeweiligen Transition). Neben der so gewonnenen Modellierung des logischen Verhaltens des DEDP gestattet die Methode der zeitbewerteten Petrinetze auch die Einbeziehung des zeitabhängigen Netzverhaltens. Im vorliegenden Anwendungsfall hat sich die Verwendung retardiert zeitbewerteter Prekanten (Kanten von den Vorstellen zu den nachfolgenden Transitionen) als zweckmäßig erwiesen. Bei diesem Konzept wird Einfluß auf die Zeitdauer der Schaltbarkeit der Transitionen genommen, während der eigentliche Schaltvorgang der Transitionen selbst, ganz im Sinne des Petri'schen Ansatzes, ohne zeitlichen Einfluß bleibt. Transitionen, die das Eintreten von Störungen bzw. Fehlern als unbeabsichtigter Zustandsveränderung darstellen, werden – alternativ zu den entsprechenden regulären Transitionen als beabsichtigter Zustandsveränderung – in der Simulation so geschaltet, daß ihr Schaltzeitpunkt einer realistischen Zufallsverteilung genügt.

Mögliche, sich gegenseitig ausschließende Verhaltensformen des DEDP werden modelliert, indem aus einer Vielzahl möglicher alternativer Transitionen, die alle von derselben Vorstelle ausgehen, eine bestimmte Transition zum Schalten ausgewählt wird. Diese Transitionen-Schaltauswahl kann graphisch als Weichenstellung für die Festlegung der Markenpfade verstanden werden, wie in Bild 2 skizziert ist. Hierzu wurden zunächst einige einfache, jedoch sehr effektive Entscheidungsregeln auf Basis der aktuellen Netzmarkierung formuliert, womit elementare Strategien des Anlagenfahrers ausgedrückt werden konnten. Für das Petrinetz der detailliert modellierten Fertigungszelle der unteren PN-Ebene reicht dieser einfache Konflikt-Steuerungsmechanismus auf Basis der Entscheidungsregeln vollkommen aus. Zur Beschreibung des gesamten Fertigungssystems mit seiner hohen Steuerungskomplexität bedarf es freilich noch der Erweiterung und Modifikation, auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird. Die hierarchisch aufgebaute PN-Modellierung der Fertigungsanlage erfolgt – wie oben angedeutet – in zwei Ebenen. Dabei stellt die obere Ebene ein Verbundsystem elementarer Netzmodule dar, die Fertigungsmaschinen repräsentieren. Diese Netzmodule sind an eine Netzschleife als Modell eines Materialflußsystems

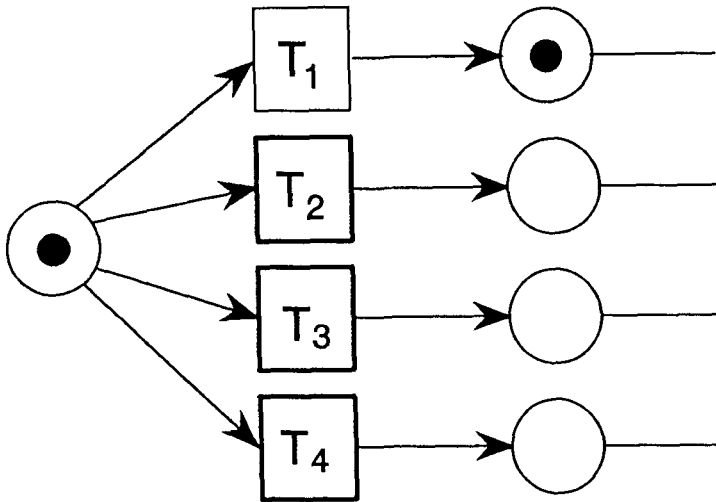


Bild 2:

Konfliktsituation im Petrinetz: Eine der aktivierten Transitionen T_2, T_3, T_4 wird durch Entscheidungsregeln zum Schalten ausgewählt; T_1 ist nicht schaltbar, da ihr Nachbereich markiert ist.

gekoppelt (Bild 3). Den elementaren Netzmodulen entsprechen auf der unteren PN-Darstellungsebene jeweilige PN-Maschinenmodelle in sehr verfeinerter Darstellung, die bei der dynamischen Netzsimulation als LISP-Unterprogramme im Hintergrund mitlaufen, auf Benutzerwunsch auf dem Bildschirm gezeigt werden können und Aufschluß über die aktuelle Bearbeitungs- und Fehlersituation geben.

Für die Softwarerealisierung der Petrinetze wurde ein eigenes Softwarewerkzeug aufgebaut, da weder Expertensystem-Tools, noch derzeit verfügbare PN-Tools den grundlegenden Anforderungen zum Netzentwurf und zur dynamischen Simulation genügten und sich auch nicht als ausreichend offen zur Einbindung mathematischer Optimierungsverfahren wie der Minimax-Algebra erwiesen. Mit dem entwickelten Simulationsprogramm, das in Common-LISP auf einer SUN-Workstation 4/330 erstellt wurde, kann ein Petrinetz entworfen, auf dem Bildschirm graphisch ausgegeben, analysiert und dynamisch simuliert werden. Es kann entweder eine automatische Simulation durchgeführt werden, wobei die zu schaltenden Transitionen über die o.g. Entscheidungsregeln ausgewählt werden, oder alternativ eine interaktive Simulation, bei welcher der Benutzer die zu schaltenden Transitionen selbst auswählt. Die jeweilige Darstellungsebene kann vom Benutzer während des Programmdurchlaufs auf dem Bildschirm generiert werden, abhängig davon, ob er die Netzdynamik des Maschinenverbundsystems studieren möchte oder sich nur für die detailliert dargestellten Bearbeitungsvorgänge in einer einzigen Maschine interessiert.

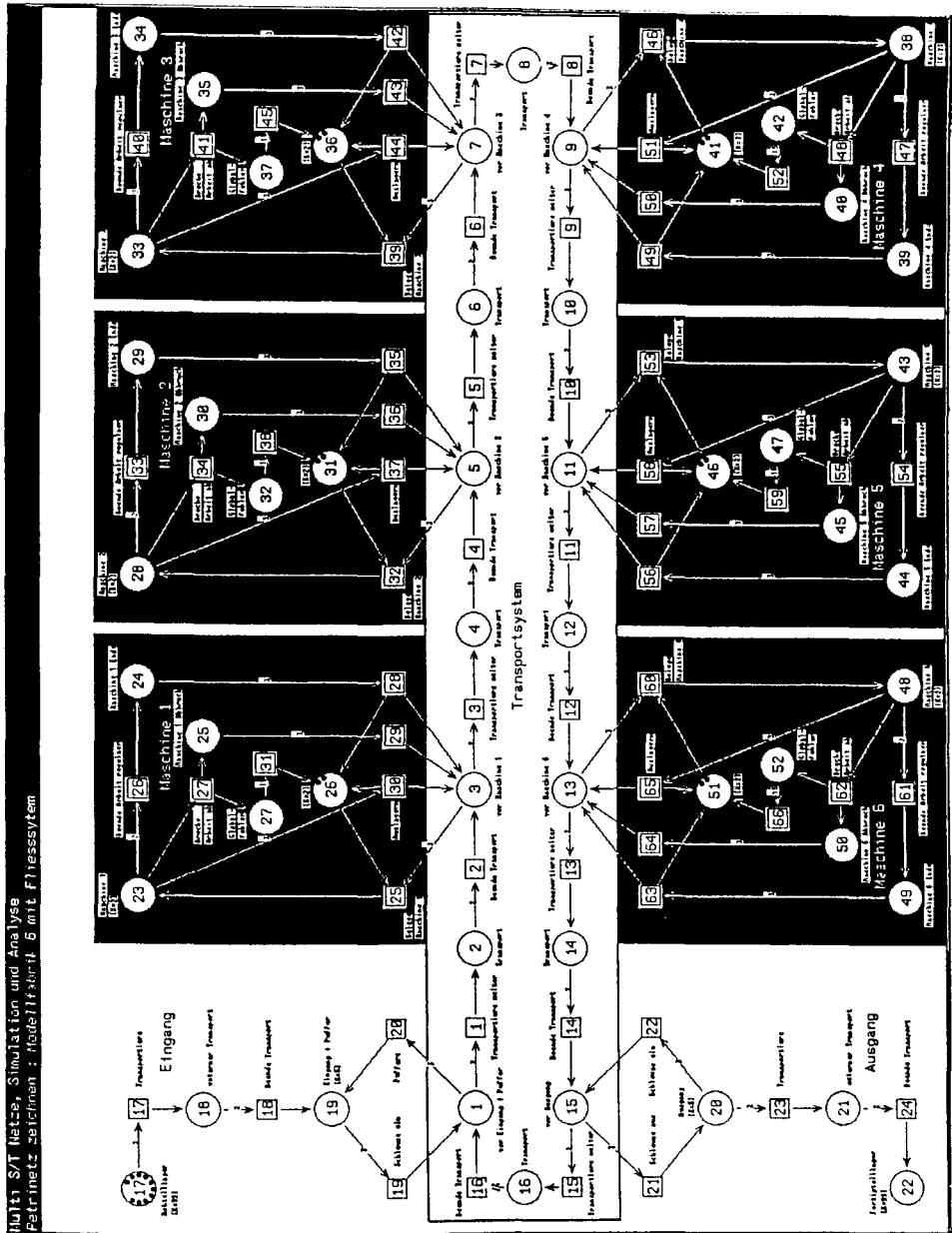


Bild 3:
Fertigungsanlage der oberen PN-Ebene mit 6 Maschinen und Transportsystem.

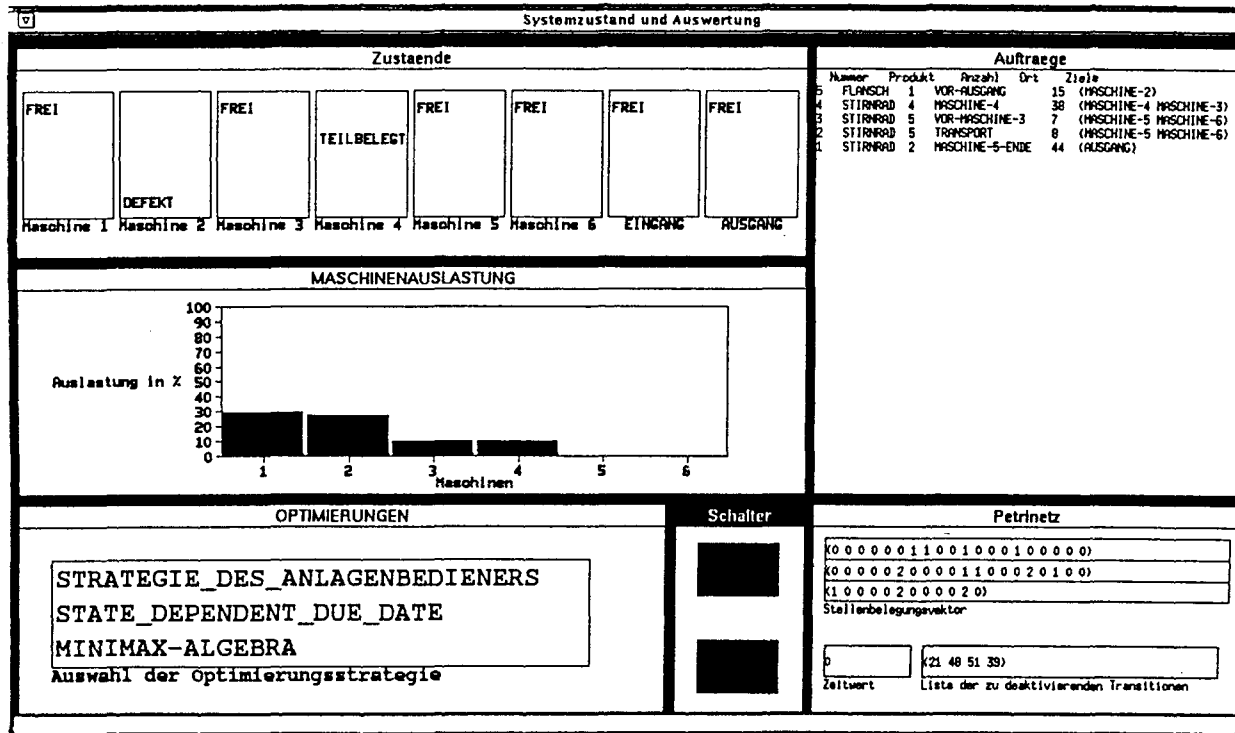
3. Wissensbasierter Ansatz zur Planung und Steuerung

Einfache Steuerungsmechanismen, wie sie im vorangegangenen Abschnitt angesprochen wurden, könnten zwar vom Petrinetz als dessen topologischer Bestandteil selbst erbracht werden, jedoch führt bereits eine geringe Zahl einfachster, im Petrinetz einmodellierter (und damit starrer) Entscheidungsfindungen zu einem drastischen Anwachsen von Netzelementen, womit die programmtechnische Beherrschbarkeit der parallelen Prozeßabläufe und die für FFS charakteristische Entscheidungsflexibilität verloren gehen.

Die Behebung einer Konfliktsituation im Petrinetz, wie sie in Bild 2 illustriert ist, kann im erweiterten Sinne als Aktion eines Expertensystems in das PN verstanden werden, womit nun auch der sehr komplexen Steuerungsstruktur des stark vernetzten Fertigungsgesamtsystems Rechnung getragen werden kann. Dem Gedanken der Fertigungsflexibilität folgend, muß dieses Expertensystem neben der aktuellen Netzmarkierung auf Informationen wie Werkstückidentifikation, Produktionsplan, vorgesehener Maschinenpfad (Ablaufolge der Bearbeitung), Bearbeitungszustand etc. zurückgreifen können, die als ständig aktualisierte Informationsprotokolle symbolisch von den Marken getragen werden. Die Marken, die bei den hier verwendeten sog. Stellen-Transitionen-Netzen (S/T-Netzklasse) ununterscheidbare Einheiten sind, werden dazu durch Anwendung der LISP-Routine „Markenidentifikation“ zu jedem Zeitpunkt im PN-System identifiziert, ihr bisheriger Weg liegt dabei stets protokolliert vor und ihr voraussichtlicher Weg, der sich jedoch durch Störungen ändern kann, ist vorherbestimmbar. Auf diese Weise werden die Marken zu Trägern wichtiger Informationen, die für die komplexe Steuerungsstruktur des Gesamtsystems eine entscheidende Bedeutung haben. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, der Klasse der S/T-Netze „treu“ bleiben zu können, und dennoch Mechanismen einzubinden, die bislang der Klasse der Farbigen Petrinetze bzw. der Prädikat-Transitionen-Netze vorbehalten waren. Das hier vorgestellte Verfahren scheint hinsichtlich der Veränderung von Information und damit der Steuerungsstruktur selbst flexibler zu sein. Zudem sind S/T-Netze mit bewährten Konzepten analysierbar, während bezüglich der letztgenannten PN-Klassen Bedenken angebracht sind [1].

Die Steuerung des Fertigungsablaufs des Gesamtsystems wird, wie oben schon erwähnt, über einen wissensbasierten Ansatz auf der Basis der in LISP geschriebenen XPS-Entwicklungsumgebung „Goldworks“ vorgenommen, womit eine programmtechnisch gut realisierbare Interaktion der DEDP-Blöcke „Petrinetz“ und „Planung und Steuerung“ (P&S) aus Bild 1 möglich wird. Das durch die Anforderungen an eine FFS-Steuerung gemäß der Blöcke „PPS“ und „Steuerungsebene“ links in Bild 1 mittlerweile sehr umfangreiche Steuerungssystem würde sich ohne den Einsatz einer Wissensbasierten Komponente kaum so übersichtlich und flexibel strukturieren lassen. In diesem Steuerungssystem sind neben heuristischen Methoden wie Vorbelegungsplanung einschließlich der Bestimmung von Fertigungspfaden, Strategien der Anlagenbediener und Prioritätsregeln wie die im Bereich des Operations Research bewährte „state-dependend-due-date-Regel“ [4], auch analytische Optimierungsmethoden auf Basis

Bild 4:
Benutzeroberfläche des Steuerungsrechners (Hardcopy).



der Queue-Theorie [5] und der Minimax-Algebra ([6] bis [9]) eingebunden. So kann der Strategie des Maschinen- bzw. Anlagenfahrers ausreichend Rechnung getragen und andererseits der Rechenaufwand für die Optimierung des Gesamtsystems in Anbetracht der kombinatorischen Explosion deutlich reduziert werden.

Die oben angesprochene Interaktion der DEDP-Blöcke „Petrinetz“ und „P&S“ wurde soft- und hardwaretechnisch durch eine entsprechende Interprozeßkommunikation zweier Workstations gelöst, da ein Multi-User-Betrieb auf einem Rechner zu einer Überlastung des Rechnersystems führt. Der erste, die P&S-Ebene repräsentierende Rechner (Steuerrechner), verwaltet das Wissensbasierte System mit dem Steuernetzwerk. Der zweite, die PN-Ebene repräsentierende Rechner verwaltet die in Kapitel 2 angesprochene PN-Simulationssoftware (PN-Rechner). Durch simultane Bildschirmausgaben beider Rechner können die synchronen Aktionen der P&S-Ebene kontrolliert werden.

Bild 4 zeigt die Benutzeroberfläche des Steuerrechners [9]. Das Feld „Zustände“ liefert den Status [„FREI“ / „TEILBELEGT“ / „VOLLBELEGT“ / „DEFEKT“] für die 6 Bearbeitungsmaschinen und die Ausgang-/Übergabestation. Die prozentuale Auslastung der Maschinen seit Simulationsbeginn wird in der Graphik „Maschinenauslastung“ wiedergegeben. Im Feld „Aufträge“ werden die Objekte der Auftragsklasse mit einigen ausgewählten Eigenschaften angezeigt, die sich im System befinden. Das Feld „Petrinetz“ zeigt den Stellenbelegungsvektor des Netzes, die Simulationszeit und als Ergebnis des Inferenzmechanismus die Liste der zu deaktivierenden Transitionen an. In dem Menüfeld „Optimierungen“ kann eine von drei implementierten Optimierungsstrategien ausgewählt werden. Durch „Bedienung“ des Schalters mittels Mauseklick wird der Steuerrechner gestartet bzw. gestoppt.

Zur Veranschaulichung der DEDP-Ebene „Realer Fertigungsprozeß“, wird schließlich eine Visualisierung des gesamten FFS in Form eines beweglichen Maschinenmodells (Bild 5) auf einem dritten Rechner realisiert, der in geeigneter Weise von der Steuerung aktiviert wird [9].

4. Simulationsergebnisse

Um Aussagen über die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Optimierungsstrategien treffen zu können, wurden in [9] umfangreiche Simulationen des Fertigungsablaufs durchgeführt, wovon hier ein typisches Beispiel angegeben wird. Dabei wurde entsprechend der Fertigungsanlage nach Bild 5 davon ausgegangen, daß Maschine 1 und 2, 3 und 4 sowie 5 und 6 ersetzend sind. Die Aufträge umfassen die Fertigung von Paletten mit jeweils 5 Stirnrädern, 4 Flanschen, 4 Gehäusen, 5 Kurbelwellen und 5 Radnaben. Transport- und Rüstzeiten sind berücksichtigt; vorgegebene Maschinenprioritäten sind Maschine 1, Maschine 3, Maschine 5. Bild 6 zeigt die Simulationsergebnisse für den Fall, daß keine Störungen während der Auftragsbearbeitung auftreten. Die Verfahrensgüte orientiert sich an der benötigten Gesamtdurchlaufzeit und der erzielbaren Homogenität der Maschinenauslastung. Erkennbar zeigt die analytische Optimierung mittels der Minimaxalgebra bezüglich beider Kriterien Überlegenheit. Wegen der größeren Rechenzeit ist dieses Verfahren jedoch primär für die Vorbelegungsplanung geeignet.

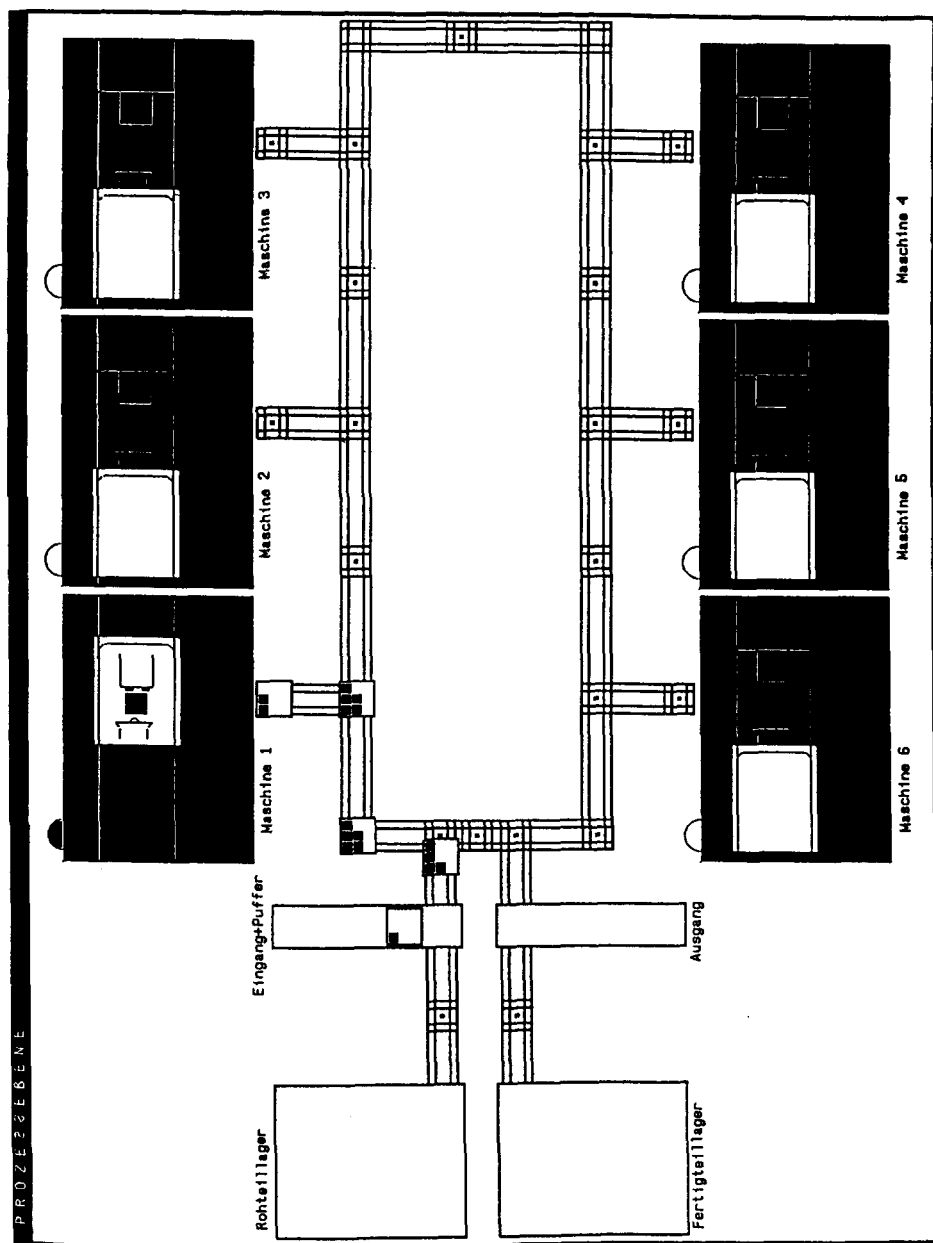


Bild 5:

Bildschirm-Hardcopy des dynamischen Funktionsmodells des realen Prozesses.

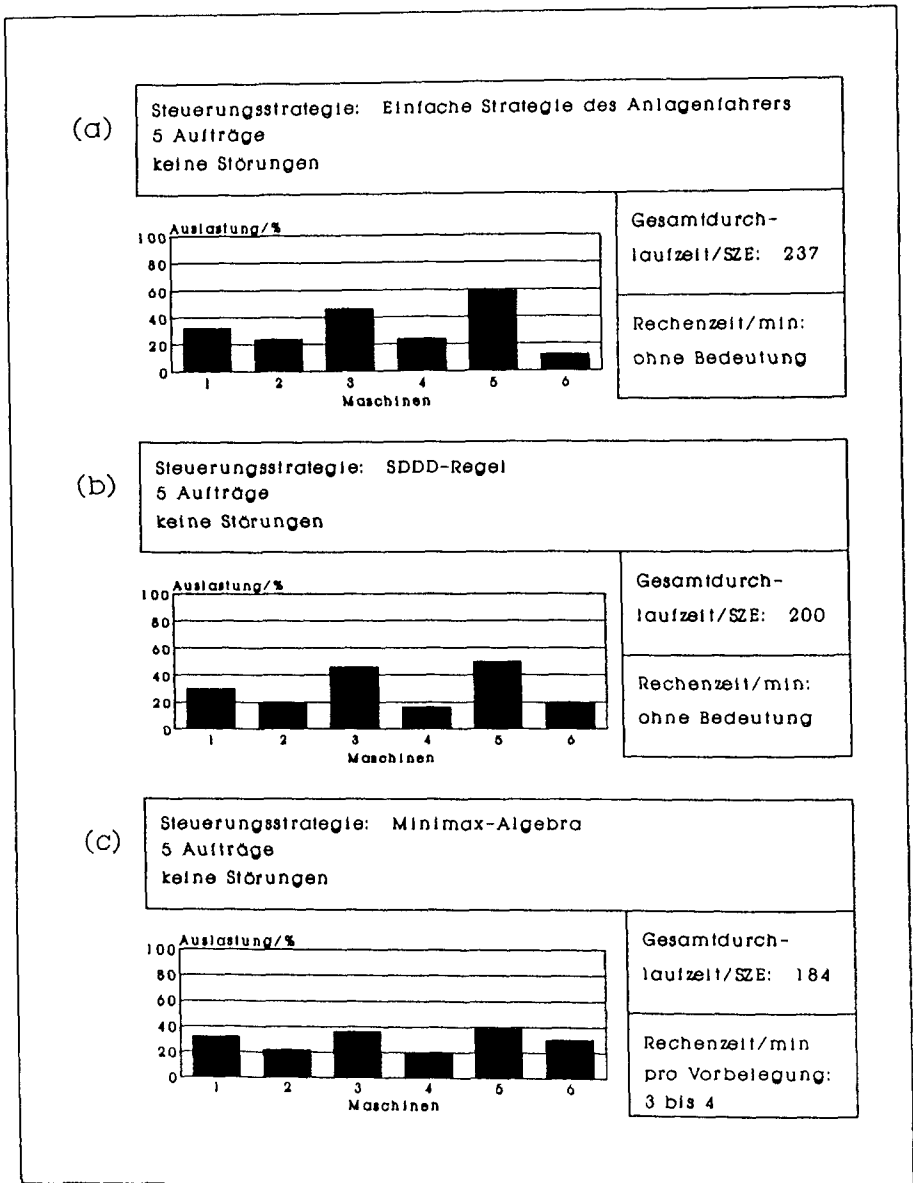


Bild 6:
Simulationsergebnisse bei Bearbeitung von 5 Aufträgen ohne Störungen.

5. Schlußbemerkung

In diesem Beitrag wurde eine Beschreibungsmethodik für diskrete ereignisorientierte dynamische Prozesse, speziell flexible Fertigungssysteme, vorgestellt, die – ausgehend vom klassischen Ebenenmodell der Fertigungssteuerung – eine hierarchisch zeitbewertete Petrinetzstruktur ergänzt um eine wissensbasierte Komponente zur Realisierung und Optimierung der Steuerung umfaßt. Dabei kommen sowohl heuristische Prioritätsregeln zur Maschinenbelegung als auch die analytische Methode der Minimax-Algebra zur Anwendung. Die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Steuerungsstrategien wird beispielhaft anhand von Simulationen demonstriert. Über die Fertigungsproblematik hinaus liegt damit aber ein methodischer Ansatz zur systemtheoretischen Behandlung anderer Prozesse des ereignisdiskreten Typs vor, wie er etwa im Bereich der Versorgung/Entsorgung, Energieverteilung oder Verkehrsflußsteuerung auftritt.

Literatur

- [1] Abel, D.: Petrinetze für Ingenieure. Springer 1990.
- [2] König, R., Quäck, L.: Petrinetze in der Steuerungs- und Digitaltechnik. Oldenburg 1988.
- [3] Glüer, D., Schmidt, G.: Die Anwendung von Petrinetzen zu Modellbildung, Simulation und Steuerungsentwurf bei flexiblen Fertigungssystemen. at 1988, Heft 12, S. 463–471.
- [4] Conway, R. W., Maxwell, W. L., Miller, L. W.: Theory of scheduling. Addison-Wesley Publishing Company 1967.
- [5] Walrand, J.: Introduction to Queueing Networks. Prentice-Hall 1988.
- [6] Cuninghame-Green, R.: Minimax-Algebra. Lecture Notes in Economics and Mathem. Systems. Springer 1979.
- [7] Cohen, G., Dubois, D., Quadrat, J. P., Viot, M.: A Linear-System-Theoretic View of Discrete-Event Processes and Its Use for Performance Evaluation in Manufacturing. IEEE Trans. Aut. Control, Vol. 30, March 1985.
- [8] Engell, S.: Modelling and on-line scheduling of FFS. IFAC-Symposium „Large scale Systems 89“, Berlin (DDR), Preprints, S. 379–383.
- [9] Rehkopf, A.: Steuerung des ereignisdiskreten Fertigungsablaufs in einer CIM-Zelle unter Einbeziehung heuristischer und analytischer Optimierungsstrategien. Dissertation Universität Karlsruhe 1992.

Prof. Dr. V. Krebs
 Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme der Universität Karlsruhe
 Kaiserstraße 12 · 76128 Karlsruhe